

## РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ НЕЛИНЕЙНЫХ РЕЗИСТОРОВ ОГРАНИЧИТЕЛЕЙ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ

Петков А.А.

Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт "Молния"  
Национального технического университета "Харьковский политехнический институт"  
Украина, 61013, Харьков, ул. Шевченко 47, НИПКИ "Молния"  
тел./факс (057) 707-62-80, E-mail: [alex@kpi.kharkov.ua](mailto:alex@kpi.kharkov.ua)

In work the model of the nonlinear resistor containing capacity and nonlinear resistance is considered. Ratios for a parametres selection of model are resulted.

В современных условиях надежная работа электротехнического и электронного оборудования в значительной мере определяется техническими возможностями ограничения перенапряжений, воздействующих на их изоляцию в процессе эксплуатации.

Наиболее эффективные устройства для ограничения перенапряжений, разработанные в настоящее время для защиты электротехнического оборудования, включают в свой состав нелинейные резисторы (НР) [1 – 3].

Учитывая значимость функций, выполняемых НР, при изготовлении и поставке они подвергаются различного рода квалификационным испытаниям, например [1]. НР нашли также дополнительную область применения в высоковольтных испытательных устройствах [4]. При проведении испытаний НР и их использовании для формирования импульсов тока и напряжения необходима информация о параметрах, характеризующих электрические свойства НР, которые определяют форму импульса тока через НР и напряжение на его выводах.

Как указано в [2, 3], вольтамперная характеристика (ВАХ) НР ограничителей перенапряжений может быть описана выражением вида:

$$u = Ni^{\alpha}, \quad (1)$$

где  $N > 0$  и  $0 < \alpha < 1$  – некоторые числовые коэффициенты;  $i$  – ток, протекающий через резистор.

Коэффициенты ВАХ резисторов, используемых в электроэнергетике, при импульсных режимах работы изменяются в широких пределах в зависимости от типоразмера НР и амплитудно-временных параметров протекающего через них импульса тока [2, 3, 5]:  $\alpha = 0,04 \dots 0,7$ ;  $N = 40 \dots 2700 \text{ В/А}^{\alpha}$ .

Для проведения расчетов переходных процессов в электрических цепях, содержащих НР необходимо знать сопротивление резистора, которое из (1) определится как

$$R = Ni^{-\beta}, \quad (2)$$

где  $\beta = 1 - \alpha > 0$ .

Как видно из (2), активное сопротивление  $R \rightarrow \infty$  при  $i \rightarrow 0$ , что вызывает определенные сложности при расчетах импульсных режимов работы, характерных для НР. Реально, бесконечный скачок сопротивления отсутствует. В связи с этим необходимо иметь расчетные модели НР, которые бы обеспечили корректность вычислительного процесса. Учитывая конструктивное исполнение резисторов ограничителей перенапряжений и рекомендации [22], расчетная модель НР в импульсном режиме может быть представлена в виде, показанном на рис. 1. В этом случае модель НР представляет собой параллельное соединение емкости и нелинейного сопротивления вида (2). Расчеты с использованием данной модели не имеют особенностей при  $i \rightarrow 0$ . Однако в литературе отсутствуют рекомендации по выбору величины емкости модели  $C_R$ , которая может

оказывать существенное влияние на характеристики импульсов тока, протекающего через НР и напряжения на его выводах.

Целью настоящей работы является определение взаимосвязи параметров модели нелинейного резистора, обеспечивающей корректность расчетов переходного процесса в испытательной схеме.

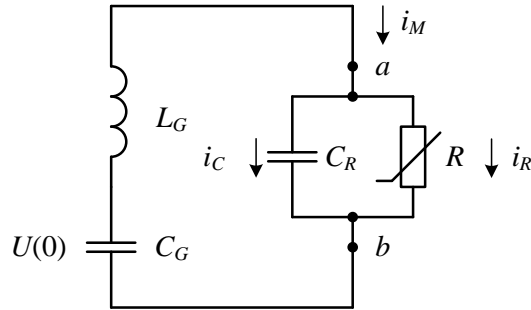


Рис. 1. Расчетная схема разряда емкостного накопителя энергии на НР.

$U(0)$ ,  $C_G$ ,  $L_G$  – зарядное напряжение, емкость и индуктивность емкостного накопителя энергии;  $C_R$ ,  $R$  – емкость и активное сопротивление модели НР;  $i_M$ ,  $i_C$ ,  $i_R$  – токи в ветвях расчетной схемы;  $a$ ,  $b$  – внешние выводы НР

Переходный процесс в схеме, представленной на рис. 1, может быть описан следующей системой безразмерных интегро-дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \int_0^\tau I_M d\tau + \frac{dI_M}{d\tau} + \frac{1}{C_{RG}} \int_0^\tau I_C d\tau = 1; \\ -\frac{1}{C_{RG}} \int_0^\tau I_C d\tau + BI_R^\alpha = 0; \\ I_M = I_C + I_R, \end{cases} \quad (3)$$

$$\text{где } B = NU(0)^{\alpha-1} \left( \sqrt{\frac{C_G}{L_G}} \right)^\alpha; \quad I_j = \frac{i_j}{U(0)} \sqrt{\frac{C_G}{L_G}}, \quad j = \{M, C, R\}; \quad C_{RG} = \frac{C_R}{C_G}; \quad \tau = \frac{t}{\sqrt{L_G C_G}}.$$

Как видно из (3), переходный процесс в схеме зависит от трех безразмерных параметров:  $B$ ,  $\alpha$ ,  $C_{RG}$ . Проведем анализ влияния параметра  $C_{RG}$  на  $U_{\max}$  – максимальное значение импульса напряжения на НР и  $T_{\max}$  – время достижения максимального значения напряжения. На рис. 2 приведены графики изменения граничного значения параметра  $C_{RG}$  в зависимости от параметров  $B$  и  $\beta$ . При значениях, лежащих ниже кривых, показанных на графиках, влияние не превышает 1%. При значениях, лежащих выше кривых – следует признать влияние  $C_{RG}$  на  $U_{\max}$  и  $T_{\max}$  существенным. Аналогичные результаты имеют место при анализе импульса тока, протекающего через НР.

Таким образом, исходя из графиков, расчеты можно считать корректными, если для  $C_{RG}$  выполняются следующие условия, которые получены с использованием данных рис. 2:

– для  $B = 3$  и  $0,3 \leq \beta \leq 0,8$

$$C_{RG} \leq e^{-6,9e^{1,08\beta}}; \quad (4)$$

– для  $1 \leq B \leq 3$  и  $\beta = 0,8$

$$C_{RG} \leq 1 \cdot 10^{-4} e^{-2,308B}. \quad (5)$$

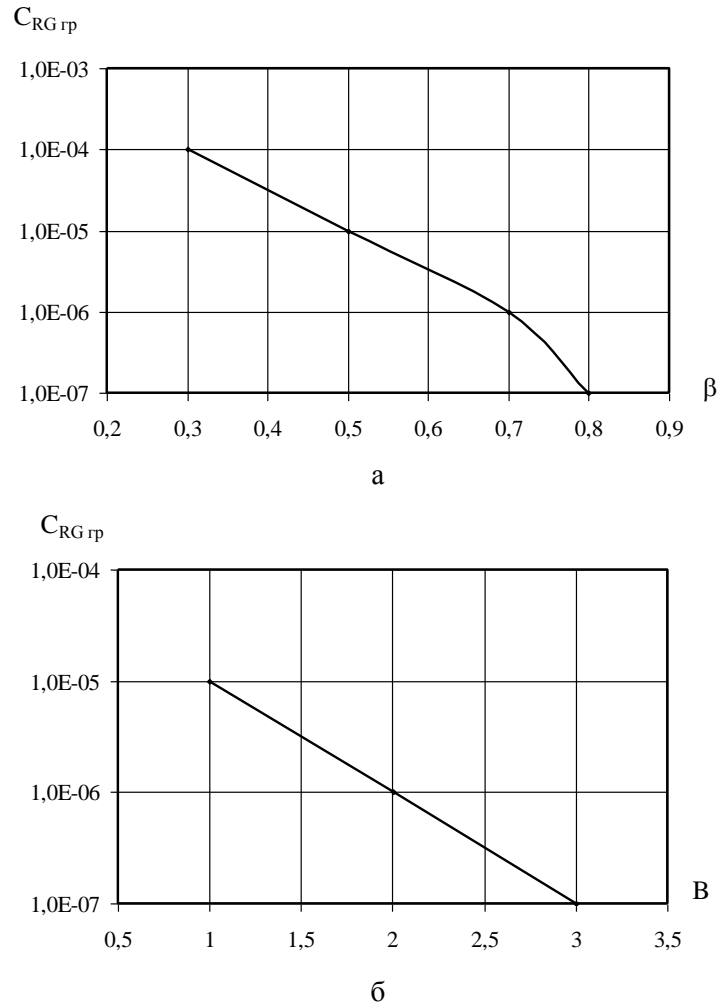


Рис. 2. Изменение граничных значений  $C_{RG}$ .  
а – при  $B = 3$ ; б – при  $\beta = 0,8$

При этом имеют место следующие соотношения для амплитудно-временных параметров импульса, полученные путем аппроксимации расчетных данных.

Максимальное значение импульса тока, протекающего через НР:

– для  $B = 3$  и  $0,3 \leq \beta \leq 0,8$

$$i_{\max} = \frac{U(0)}{\sqrt{\frac{L_G}{C_G}}} (0,18\beta^2 - 0,55\beta + 0,33); \quad (6)$$

– для  $1 \leq B \leq 3$  и  $\beta = 0,8$

$$i_{\max} = 0,29 \frac{U(0)}{\sqrt{\frac{L_G}{C_G}}} B^{-3,7}. \quad (7)$$

Максимальное значение импульса напряжения на выводах НР:

– для  $B = 3$  и  $0,3 \leq \beta \leq 0,8$

$$U_{\max} = 1,03U(0)\beta^{0,12}; \quad (8)$$

– для  $1 \leq B \leq 3$  и  $\beta = 0,8$

$$U_{\max} = U(0)(1 - 3,4e^{-2,3B}). \quad (9)$$

Время нарастания импульса до максимального значения для тока и напряжения:

– для  $B = 3$  и  $0,3 \leq \beta \leq 0,8$

$$T_{\max} = \sqrt{L_G C_G}(-2,37\beta^2 + 1,38\beta + 0,57); \quad (10)$$

– для  $1 \leq B \leq 3$  и  $\beta = 0,8$

$$T_{\max} = \sqrt{L_G C_G}(0,17B^2 - 1,23B + 2,3). \quad (11)$$

Погрешность вычисления по соотношениям (6) – (11) не превышает 5%.

Как видно из рис. 2, графики имеют ниспадающий характер, что позволяет использовать соотношения (4) и (5) как нижние оценки граничных значений  $C_{RG}$  соответственно при  $B < 3$  и  $\beta < 0,8$ .

По результатам работы можно сделать следующие выводы:

1. Получена взаимосвязь параметров модели нелинейного резистора ограничителей перенапряжения, обеспечивающая корректность расчетов переходных процессов в испытательных схемах.

2. Предложены аналитические выражения для определения параметров, характеризующих нарастание значений импульсов тока, протекающего через нелинейный резистор и напряжения на его выводах.

Материалы работы могут быть использованы для дальнейшего развития модели нелинейных резисторов на основе теории и экспериментальных исследований.

## ЛИТЕРАТУРА

- ГОСТ 16357-83 Разрядники вентильные переменного тока на номинальные напряжения от 3,8 до 600 кВ. Общие технические условия. М.: Издательство стандартов, 1983. – 40 с.
- Крыжановский В.В., Табарданова М.П. Исследование импульсных вольт-амперных характеристик ограничителей с окисноцинковыми резисторами // Исследования и области применения ограничителей перенапряжений: Сб. научных трудов НИИПТ. – Ленинград: Энергоиздат, 1981. – С. 31 – 39.
- Базуткин В.В., Ларионов В.П., Пинталь Ю.С. Техника высоких напряжений: Изоляция и перенапряжения в электрических системах: Учебник для вузов / Под общ. ред. В.П. Ларионова. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 464 с.
- Григорьев А.В., Титков В.В., Шнеерсон Г.А. Применение нелинейных резисторов для формирования импульсов тока емкостных накопителей // Тезисы докладов расширенного заседания секции IV научного совета АН СССР на тему: Емкостные накопители энергии в электрофизических установках предельных параметров". 14-18 декабря 1981 г. – Харьков: ХПИ, 1981. – С. 16 – 17.
- Недзельский О.С., Петков А.А. Исследование динамических вольт - амперных характеристик нелинейных резисторов ограничителей перенапряжения // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Електроенергетика і перетворююча техніка. – Харків: НТУ "ХПИ". – №7. – 2006. – С. 131 – 135.